

OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN EN MEDIOS POROSOS INERTES UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Hernán A. Olguín^a, Luis C. Perez^b, Mario G. Toledo^b

^aGZB-International Geothermal Center, Lennershofstraße 140, Bochum, Germany,
hernan.olguin@geothermie-zentrum.de, <http://www.geothermie-zentrum.de>

^bDepartamento de Ingeniería Mecánica, Aula UTFSM CIMNE, Universidad Técnica Federico Santa María, Av. España 1680, Valparaíso, Chile, luis.perez@usm.cl, mario.toledo@usm.cl,
<http://www.usm.cl>

Palabras claves: Combustión, Medios Porosos Inertes, Algoritmos Genéticos.

Resumen. Los quemadores de medios porosos inertes (MPI) presentan ventajas comparados con quemadores convencionales de llamas libres como son: amplio rango de potencia, alta eficiencia, compacta estructura, muy bajas emisiones de CO y NO_x, y combustión estable en un amplio rango de la relación de equivalencia. En el presente trabajo se optimizan los parámetros característicos de los procesos de combustión en MPI usando algoritmos genéticos de manera de obtener llamas de alta temperatura (superadiabáticas) en mezclas pobres de combustible + aire. Se utiliza el modelo analítico-matemático presentado por (Bubnovich and Toledo, 2007) para una reacción química de un sólo paso. Los resultados de optimización muestran que los quemadores de MPI pueden trabajar con máximas temperaturas debido al exceso de entalpía en las llamas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La combustión en MPI

Dado el panorama energético mundial, la tendencia es siempre hacia la reducción de emisiones y el uso más eficiente de los combustibles fósiles, lo cual otorga beneficios medio ambientales y económicos. En este contexto, la combustión en medios porosos inertes tiene un amplio campo de aplicación, ya sea como fuente energética en procesos industriales o como post-procesamiento para gases productos de combustión. El motivo de la mejor eficiencia entre la combustión convencional y la de medios porosos es la presencia del medio sólido inerte, el cual absorbe del calor liberado en la reacción exotérmica y lo conduce hacia la zona de entrada de la mezcla combustible-aire donde la energía es cedida por convección a la mezcla fresca que es precalentada antes de ser quemada. Esto eleva cada vez más la temperatura en el frente de llama generado, lo cual puede derivar en algunos casos a la obtención de temperaturas super-adiabáticas (Babkin et al, 1991).

La Figura 1 muestra un esquema general de un proceso de combustión en medios porosos inertes. Como se puede apreciar, es posible diferenciar 3 zonas principales. La primera se ubica delante de la zona de reacción química (parte baja de la Figura 1) y es donde ingresa el metano y el aire premezclados, los que se precalientan por el calor transmitido desde la zona de reacción. La segunda zona es la de reacción propiamente tal, que posee una longitud bastante reducida (del orden de 1 cm). En ella se lleva a cabo la liberación de energía y, como su nombre lo indica, donde reaccionan el combustible y el oxígeno del aire transformándose en productos. La tercera zona, es la posterior a la zona de reacción, y es donde los productos de combustión transfieren su entalpía al medio poroso.

Considerando que la zona de reacción química o frente de combustión viaja a través del MPI, para una aplicación particular la extracción de calor requiere la estabilización de esta zona. Los frentes de combustión se caracterizan por velocidades del orden de 0.01 cm/s en el régimen de baja velocidad (Babkin, 1993). Para controlar un frente de combustión se han investigado cuatro métodos. Un primer método considera la formación de dos zonas de MPI donde el número de Peclet es menor a 65 en la primera zona y mayor de 65 en la segunda zona (Babkin et al, 1991; Mößbauer et al, 1999; Trimis and Durst, 1997). Un segundo método considera un enfriamiento de la zona de post-combustión (Brenner et al, 2000; Bouma and De Goey, 1999). El tercer método permite controlar la llama en una zona específica mediante periódicos cambios de entrada de la premezcla combustible-aire (Hoffman et al, 1997; Contarin et al, 2003). Finalmente, el cuarto método utiliza una sección no constante de área transversal del MPI para estabilizar el frente de llama (Zdhanok et al, 1998). Por su parte, obtener las máximas temperaturas en los frentes de combustión permite extraer el calor de manera eficiente. En el presente trabajo, se estudia la variación simultánea de componentes físicos (diámetro de esferas, porosidad) y condiciones de entrada de la premezcla (relación de equivalencia, velocidad de inyección) para obtener valores máximos de temperatura de combustión en un medio poroso compuesto por esferas de alúmina del mismo diámetro.

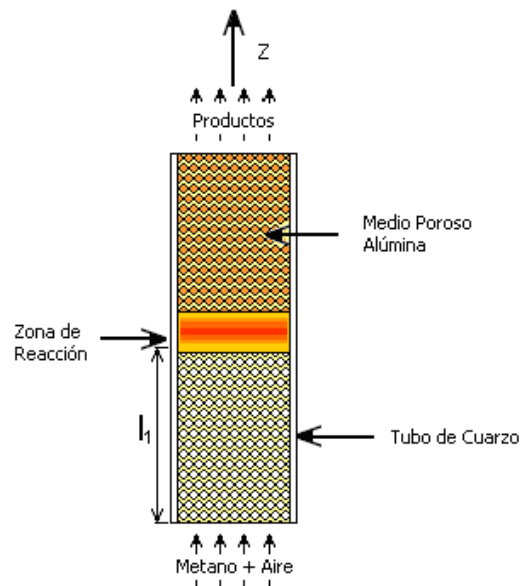


Figura 1. Esquema general de un proceso de combustión en MPI.

1.2 Los algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda que se basan en la teoría de la evolución de Darwin. Mediante una simulación de la mecánica de selección natural y la genética, estos algoritmos evolucionan un grupo de soluciones para un problema dado, mejorando en cada iteración y convergiendo finalmente, en teoría, a las soluciones óptimas del problema (Goldberg, 1989).

Con el fin de guiar la evolución hacia una población cada vez mejor, según los fines que se persiguen, se establecen ciertos criterios de selección acordes. De este modo, al cabo de un número determinado de iteraciones (generaciones), en las cuales a través de selección, recombinación y mutaciones guiadas, estos algoritmos son capaces de encontrar aproximaciones bastante certeras (si bien no exactas) del valor óptimo buscado. Es importante destacar que la precisión de estas aproximaciones depende directamente del grado de exactitud con que se evalúan los individuos de la población para su selección. Vale decir, de que tan preciso y exacto es el modelo matemático que simula el problema.

En este trabajo se utiliza el modelo matemático propuesto, resuelto analíticamente y validado por (Bubnovich and Toledo, 2007) con el fin de predecir la máxima temperatura del frente de combustión para distintas geometrías, configuraciones y condiciones de operación. Mediante el empleo de algoritmos genéticos, se busca resolver el problema multi-variable que se genera, con el fin de obtener los valores de entrada que le optimizan. En otras palabras, se buscan los valores que maximizan la temperatura con que se desplaza la zona de reacción.

Como referencias en los trabajos (Gosselin et al, 2009; Abdul et al, 2009; Elliot et al, 2004) se hace uso de esta herramienta de optimización en sistemas que consideran procesos de transferencia de energía y reacciones de combustión, como la de medios porosos inertes.

2. MODELO MATEMÁTICO Y SOLUCIÓN ANALÍTICA

En (Bubnovich and Toledo, 2007) se presenta una solución analítica a un modelo matemático del proceso de combustión en MPI. El modelo es seleccionado considerando que el sistema es isobárico y unidimensional. Las ecuaciones que gobiernan el proceso de combustión en MPI, sin considerar equilibrio térmico local entre las fases sólida y gaseosa, son las de continuidad de masa para la mezcla, de energía para el gas y para el sólido, y de continuidad para la especie química considerando la reacción química de un solo paso.

Las condiciones de borde asumen un equilibrio térmico entre el gas y el sólido. El premezclado previo de metano-aire entra con el exceso de aire, la temperatura ambiental y la velocidad de entrada del gas. A la salida del canal poroso semi-infinito se consideran las derivadas de las temperaturas y de la fracción en masa de combustible igual a cero. La selección de estas condiciones de borde es fundamental para el desarrollo de la solución analítica del trabajo.

Dada la importancia de los mecanismos de transporte de calor y masa, así como la reacción química, en el desarrollo de las ondas de combustión en MPI, éstos se seleccionan e incorporan en el modelo matemático según consideraciones generales. Algunas son: La transferencia de calor entre el sólido y la fase gaseosa se evalúa según resultados experimentales; La conductividad entre las esferas de alúmina se produce sólo a través de los puntos de contacto de las mismas; La estructura porosa en esencia es ópticamente densa alrededor de la zona de alta temperatura; La radiación es incluida en el coeficiente de conductividad térmica efectivo del medio poroso; La transferencia de calor entre el sistema y el medio ambiente ocurre a través del medio poroso solamente por convección natural y radiación térmica; Para la difusividad de especies se asume que el número de Lewis es igual a la unidad; El medio poroso es construido con esferas de alúmina; y La combustión de la mezcla metano-aire es descrita por la reacción química global de un solo paso de Arrhenius.

La metodología teórica de investigación de (Bubnovich and Toledo, 2007) se apoya en un análisis de la solución analítica original construida. Se cambia el sistema de referencia estático pasando a un sistema de referencia móvil, que viaja junto a la onda de combustión, para luego adimensionalizar e integrar el modelo matemático separadamente en tres zonas: zona de precalentamiento, zona donde ocurre la reacción química y zona ocupada por los productos de la combustión. Para cada una de las zonas se encuentran las ecuaciones que describen el comportamiento de la temperatura y concentraciones de las especies químicas. Además, para la temperatura de ignición y velocidad del frente de combustión se encuentran las ecuaciones que las calculan.

3. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Con el modelo matemático descrito en el punto anterior es posible obtener la temperatura del frente de combustión para distintos valores de porosidad, velocidad de entrada del gas, diámetro de esferas, temperatura de ignición y relación de equivalencia. La implementación de los algoritmos genéticos, al querer maximizar la temperatura de llama, ha considerado como función de aptitud el valor de la temperatura del sólido desde la ecuación de conservación de energía del medio sólido.

La resolución del problema se hizo entonces mediante un Algoritmo Genético (Goldberg, 1989; Fogel and Fogel, 1994) simple con cruce en un punto y una técnica de selección mediante ruleta común (Coello, 2008) en primera instancia e intentando reducir los tiempos de espera introduciendo una modificación posterior, la cual consiste en realizar al final de cada generación un ordenamiento de los individuos según su grado de aptitud, eliminando inmediatamente el 50% menos aptos, y permitiendo la selección únicamente en el 50% superior, en términos genéticos. Esto en principio redujo los tiempos de convergencia, pero aumentó la probabilidad de estancarse en un máximo local de la temperatura, lo que hizo surgir la necesidad de aumentar la tasa de mutación de un 80% a un 90% y con ello aumentar los tiempos de ejecución del algoritmo, perdiendo un poco de la ganancia generada por la modificación. Además de introducir cierto grado de incertidumbre que hizo necesario ejecutar el programa repetidas veces para tener certeza de no haber caído en un máximo local.

Es importante considerar que los valores generados por los algoritmos genéticos para la temperatura de ignición se deben encontrar dentro de los valores de inflamabilidad de la mezcla, de otro modo, y a pesar de que matemáticamente el problema sea resuelto, los resultados obtenidos carecerían de valor real. Para esto se utiliza la relación presentada en (Bubnovich and Toledo, 2007) para la estimación de la temperatura de ignición mínima requerida.

4. RESULTADOS

En primer lugar se realizan varios análisis que justifican la utilización de algoritmos genéticos en los procesos de combustión en MPI. Para el algoritmo creado se utilizan valores fijos como son: porosidad igual a 0.4 (40%), temperatura de ignición de 1100 K, exceso de aire de 4.88 (valor inverso a la relación de equivalencia), velocidad de entrada del gas de 1.075 m/s y diámetro de esferas de alúmina de 5.6 mm.

La Figura 2 presenta la variación de la velocidad del frente de combustión en función de la porosidad, manteniendo los demás valores fijos. En esta figura se presenta el exceso de aire para un valor de 3.33 (verde, punto), de 7 (azul, círculo) y de 10 (negro, cruz). Este mismo análisis se realiza con las demás variables del problema respecto de la velocidad del frente de combustión (V_{FC}). La Figura 3 muestra la V_{FC} versus el diámetro de esferas para una porosidad de 0.2 (verde, punto), 0.4 (azul, asterisco) y 0.6 (negro, cruz). La Figura 4 muestra la V_{FC} versus el exceso de aire (ϕ) para diámetros de esferas de alúmina de 2 mm

(verde, punto), 7 mm (azul, asterisco) y 10 mm (negro, cruz). La **Figura 5** muestra la V_{FC} versus la temperatura de ignición para porosidades de 0.2 (verde, punto), 0.4 (azul, asterisco) y 0.6 (negro, cruz); y **La Figura 6** muestra la V_{FC} versus la velocidad de entrada del gas para temperaturas de ignición de 700 K (verde, punto), 900 K (azul, asterisco) y 1100 K (negro, cruz). Estos resultados muestran valores de convergencia de las velocidades de frente de combustión que varían en un amplio rango respecto de los parámetros señalados, sin encontrar un valor cercano a la estabilización de llama. Este ejemplo, demuestra que encontrar un valor óptimo de un propiedad del proceso de combustión en MPI, como la velocidad del frente y la temperatura máxima (objetivo de este trabajo), no puede encontrarse variando parámetros por separado, lo cual manifiesta la necesidad de implementar algoritmos de búsqueda considerando todas las propiedades variables del problema.

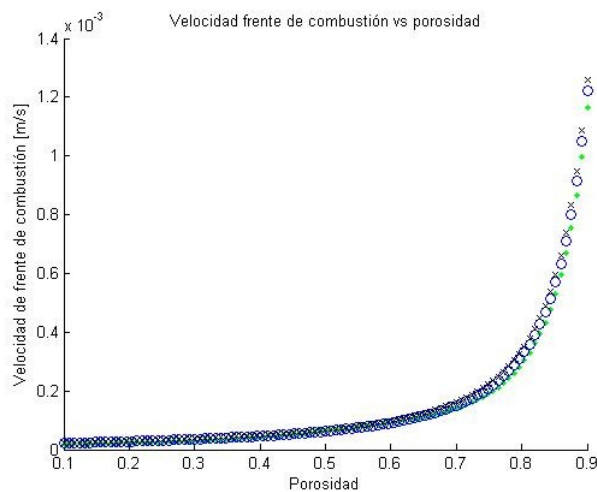


Figura 2: Velocidad del frente de combustión v/s porosidad.

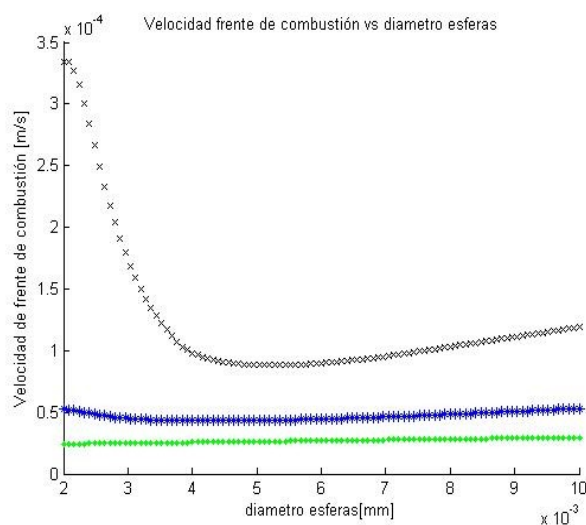


Figura 3: Velocidad del frente de combustión v/s diámetro de esferas.

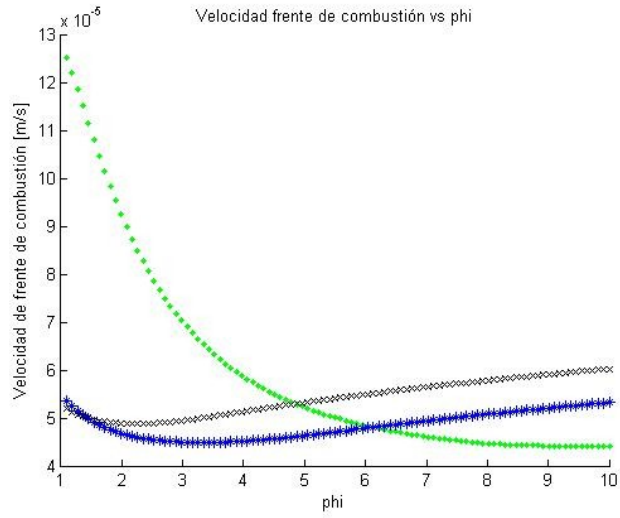


Figura 4: Velocidad del frente de combustión v/s exceso de aire (ϕ).

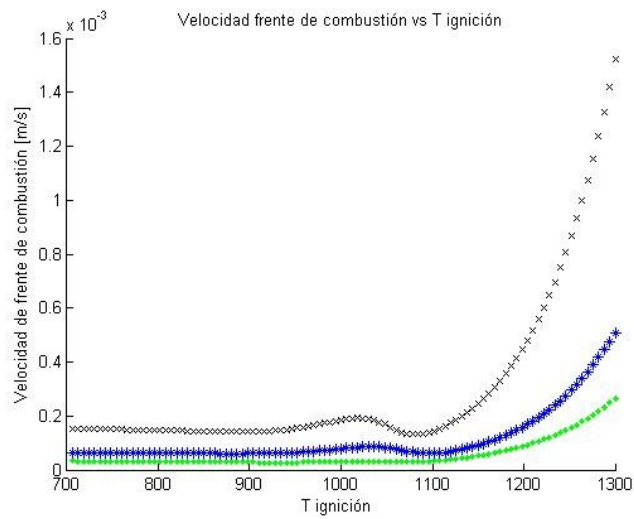


Figura 5: Velocidad del frente de combustión v/s temperatura de ignición en K.

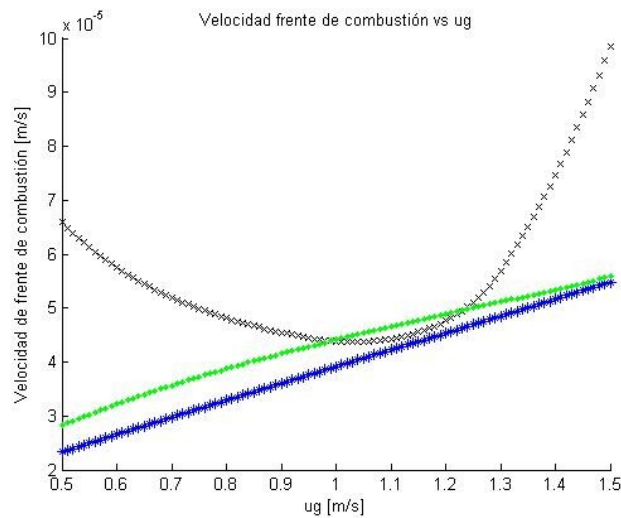


Figura 6: Velocidad del frente de combustión v /s velocidad de entrada del gas.

Finalmente, los algoritmos genéticos implementados son utilizados para obtener los parámetros a los que convergen los óptimos, dando un valor de temperatura de combustión de 1888 K. Los valores óptimos encontrados para las distintas propiedades son: porosidad igual a 0.7 (70%), temperatura de ignición de 1100 K, exceso de aire de 3.33, velocidad de entrada del gas de 1.5 m/s y diámetro de esferas de alúmina de 2 mm.

5. CONCLUSIONES

Se optimizaron los parámetros característicos que influyen en las temperaturas máximas de las llamas de metano + aire de los procesos de combustión en medios porosos inertes usando los algoritmos genéticos. Se obtiene una temperatura de 1888 K para valores optimizados de porosidad (0.7), temperatura de ignición (1100 K), exceso de aire (3.33), velocidad de entrada del gas (1.5 m/s) y diámetro de esferas de alúmina (2 mm).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte entregado por CONICYT-Chile (FONDECYT 11080106 y BASAL FB0821 - FB/32MT/10).

REFERENCIAS

Abdul Mujeebu M, Abdullah M.Z, Abu Bakar M.Z, Mohamad A.A and Abdullah M.K, A review of investigations on liquid fuel combustion in porous inert media, *Progress in Energy and Combustion Science* 35 (2009) 216–230.

- Babkin V.S., Korzhavin A.A. and Bunev V.A, Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media, *Combustion and Flame* 87 (1991) 182-190.
- Babkin V.S, Filtration combustion of gases, present state of affairs and prospects, *Pure Applied Chemistry* 65 (1993) 335-344.
- Bouma P.H. and De Goey L.P.H, Premixed Combustion on Ceramic Foam Burners, *Combustion and Flame* 119 (1999) 133-143.
- Brenner G, Pickenäcker K, Pickenäcker O, Trimis D, Wawrzinek K and Weber T, Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media, *Combustion and Flame* 123 (2000) 201-213.
- Bubnovich V. and Toledo M, Analytical modeling of flame combustion in inert porous media, *Applied Thermal Engineering* (2007).
- Coello C.; Introducción a la computación evolutiva. Apuntes de curso, *CINVESTAV – IPN, Departamento de computación, México, 2008.*
- Contarin F, Saveliev A.V, Fridman A.A and Kennedy L.A, A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers: numerical study, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 949-961.
- Elliott L, Ingham D.B, Kyne A.G, Mera N.S, Pourkashanian M. and Wilson C.W, Genetic algorithms for optimisation of chemical kinetics reaction mechanisms, *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004) 297-328.
- Fogel L. and Fogel D.; Evolutionary computation. *IEEE Transactions on neural networks*, Vol. 5, 1-2, 1994.
- Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. *Addison Wesley Publishing Company, 1989.*
- Gosselin L, Tye-Gingras M. and Mathieu-Potvin F, Review of utilization of genetic algorithms in heat transfer problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 2169-2188.
- Hoffmann J.G, Echigo R, Yoshida R. and Tada S, Experimental Study on Combustion in Porous Media with a Reciprocating Flow System, *Combustion and Flame* 111 (1997) 32-46.
- Mößbauer S, Pickenäcker O, Pickenäcker K. and Trimis D, Application of the Porous Burner Technology in Energy and Heat – Engineering, *Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment (Clean Air V)* 1 (1999) 519-523.
- Trimis D. and Durst F, Combustion in a porous medium-advances and applications, *Combustion Science and Technology* 121 (1997) 153 – 168.
- Zdhanok S.A, Dobrego K.V and Foutko S.I, Flame localization inside axis-symmetric cylindrical and spherical porous media burners, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41 (1998) 3647-3655.